

전자전에 사용되는 S-대역 스위치 필터 뱅크의 초소형화 광대역 MEMS 대역 통과 필터 구현

Wideband-Miniature MEMS Band Pass Filter of S-Band Switch Filter Bank used in Electronic Warfare

이승문^{1,2)} · 전관일²⁾ · 김남석^{*1)}

Lee Seung Moon^{1,2)} · Jeon Gwan Il²⁾ · Kim Nam-Seog^{*1)}

[초 록]

광대역 MEMS 대역 통과 필터는 통신, 레이더 및 기타 마이크로파 시스템에서 중요한 주파수 선택 구성 요소이며 그 성능은 전체 시스템 성능에 직접적인 영향을 미친다. 최근 방위 산업에서 중요시되고 있는 전자전용 무인 항공기에 적용 가능한 스위치 필터 뱅크(Switch Filter Bank)의 소형 및 경량화 개발이 중요하다. 이 논문은 낮은 삽입손실을 위해 고저항 실리콘 기판 기반으로 초소형 정밀 기계 기술 (Micro electromechanical Systems, MEMS) 공정으로 제작된 고성능 광대역 대역 통과 필터를 소개한다. 필터의 중심주파수는 4GHz이며, 비대역폭은 100%를 갖도록 인터 디지털 구조로 설계되었다. 제작된 필터는 6.95mm×4.7mm×0.42mm의 체적을 가지며, 측정된 전기적 특성은 삽입손실 4.0dB, 1.0GHz 및 7.5GHz에서 감쇠량 30dB 이상, 반사 손실 10dB 이하이다.

[ABSTRACT]

Wideband MEMS bandpass filters are important frequency-selective components in communications, radar and other microwave systems, and their performances affect overall system performances directly. Thus, it is critical to develop a compact and lightweight switch filter banks that can be applied to an unmanned aerial vehicle for electronic warfare, which is recently considered important in the defense industry. This paper introduces a high-performance wideband band pass filter fabricated by micro electromechanical systems (MEMS) process based on a high-resistance silicon substrate for low insertion loss. The center frequency of the filter is 4GHz, and it is designed in an inter-digital structure to have a fractional bandwidth of 100%. The fabricated filter has a volume of 6.95 mm × 4.7 mm × 0.42 mm and achieves an insertion loss of 4.0 dB, an attenuation of > 25 dB at 1.0 GHz and 7.5 GHz, and a return loss of < 10 dB.

Key Words : Switch Filter Bank(스위치 필터 뱅크), Wideband band Pass Filter(와이드 대역통과필터), MEMS(멤스)

1. 서론

전자전(Electronic warfare, EW)은 위협 억제, 위협 탐지 및 위협 무력화를 포함한 여러 분야를 포괄하고, 여러 가지 작동 기능이 포함된다. 첫째, 전자 지원 (Electronic Support,

ES)는 차단된 EM 환경 방출에서 파생된 감시 및 경고 정보를 제공하고, 둘째, 전자적으로 제어되는 위협으로부터 호스트 플랫폼을 보호하는 전자 자체 보호(Electronic Protection, EP) 하며 셋째, 여러 플랫폼 또는 전투 유닛으로 구성된 전투 부대를 보호하기 위해 ES와 EP를 모두 수행하는 전자 공격 (Electronic Attack, EA)이다.

전자전의 위협 감지 측면에서는 기술이 다양한 전자파 환경 (Electro Magnetic Environment, EME) 활동을 수행하고 이를 이해해야 한다. 이 프로세스에는 많은 신호를 수집하고 이를 디지털 영역으로 최대한 효율적으로 변환하는 작업이 포함된다.

1) 충북대학교 전자공학부 (Dept. of Electronics Engineering, Chungbuk National University)

2) 미소테크 R&D센터 (MISO TECH, R&D Center)

* Corresponding author, E-mail: namseog.kim@cbnu.ac.kr

Copyright © The Korean Institute of Defense Technology

Recived : December 1, 2022 Revised : December 10, 2022

Accteped : December 24, 2022



그림 1. 전자전 환경에 따른 다양한 요소 범위
 Fig. 1. Various elements rang according to the electronic warfare environment

군사 환경의 기술 발전과 다른 연결 장치의 수가 급격히 증가함에 따라, 전자전 지형은 점점 더 복잡하고 다양해지고 있다. 예를 들어, 무인 항공기(UAV)에 탑재된 광범위한 전자파 관련 시스템을 생각해 보면, 이는 전자전 지형에서 단일 요소이다(그림 1).^[1] 실행 가능한 위협 탐지를 위해 전자전 시스템은 VHF에서 Ku-band 및 그 이상의 전체 주파수 스펙트럼에서 기능해야 한다. 방위 산업에서 무인 항공기 (Unmanned Aerial Vehicle, UAV)와 같이 조종사가 탑승하지 않고 임무를 수행하도록 제작한 비행체와 유인 항공기의 정찰기에서도 독립된 체계와 지상, 항공, 우주와 연동시키면서 운용한다.

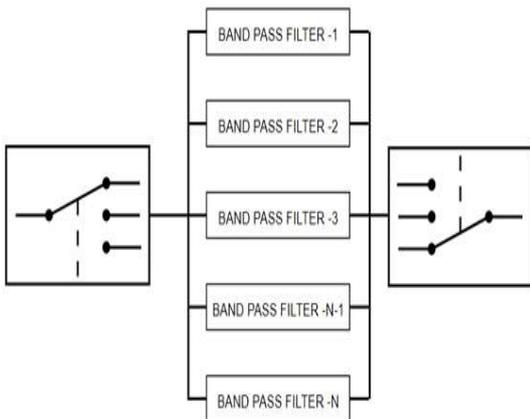


그림 2. 스위치 필터 बैं크 구성
 Fig. 2. Switch filter bank configuration

이러한 접근에서, 스위치 필터 बैं크는 고정 주파수로 상향 변환하기 전, 그 주파수로 필터링한 후, 다시 필터링하기 전, 적절한 IF로 하향 변환하기 전, 사전 선택 기능을 수행한다.^[2] 사전 선택을 통해 설계자는 작업 범위를 파악할 수 있다. 입력의 광대역 특성을 고려할 때, 2단계 변환 방법은 설계자가 직면할 수 있는 주파수 계획 문제를 상당히 감소시킨다. 낮은 손

실과 높은 선택성을 제공하는 고성능 스위치 필터 बैं크를 구축하는 것은 엄격한 크기 제약으로 인해 특히 어렵다. 크기, 중량 및 입력 파워는 국방 및 항공우주 분야에서 성공을 거두기 위한 기본 요소이다. 그림 2와 같이 스위치 필터 बैं크의 설치 공간은 시스템의 70% 이상의 부피를 차지하여, 체적을 최소화하면, 추가 기능을 위한 설치 공간이 확보되고 RF 시스템의 무게가 줄어든다.

작은 수동 대역 통과 필터의 부품은 통신 시스템의 주요 장치로 수동 장치의 크기와 무게가 시스템의 부피를 결정한다. 이런 이유로 소형화 수동 대역 통과 필터를 효율적으로 개발하는 것으로 연구 방향을 결정한다. 특히, 방위 산업업계의 항공, 우주 통신 시스템에서의 부품은 부피, 중량의 중요성이 아주 민감한 부분으로 필수적으로 마이크로파 수동 대역 통과 필터를 사용한다. 이 때문에 전자전 스위치 필터 시스템에 사용되는 초소형화 광대역 MEMS 대역 통과 여파기를 소개한다.

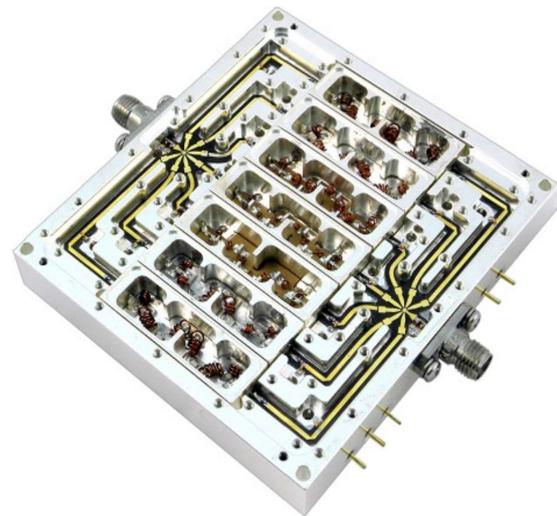


그림 3. 스위치 필터 बैं크 시스템
 Fig. 3. Switch filter bank system

수동 대역 통과 필터는 통신 시스템에서 사용자가 원하는 주파수 대역을 통과하고 그 외 주파수들은 감쇄하는 역할, 시스템에서의 성능에 삽입손실에 직접 영향을 미치는 부품이다. 현재 사용되고 있는 수동 대역 통과 필터의 종류에는 여러 가지가 있다. 삽입손실 특성에서는 가장 좋은 성능을 구현하는 구조는 캐비티 필터(Cavity Filter)이다.^[3] 하지만 제작 구조의 재질을 알루미늄 소재를 사용하고, 유전율 1의 값을 이용하여 1/4파장의 길이가 길어지고, 공진기는 철 황동 등을 사용하기에 원자재에 따라서 크기와 무게가 많은 부분을 차지하고, 외부는 알루미늄으로 비중 2.7로 무게가 무겁고 부피가 커진다. 이를 보완하기 위해 제품의 무게를 줄인 LC 필터를 사용하기도 한다. 크기는 캐비티 필터보다 소형화하여 사용할 수 있는 장점이 있으나, 삽입손실은 주파수가 높아질수록 커패시터와 인덕턴스의 Q 값이 작아져, 삽입 손실 값이 현저히 내려간다. 이 때문에 L-Band 이상에서는 적용하기 어려운 점이 있다.

다른 기술로 PCB 기판을 이용하여 마이크로 스트립구조의 필터가 있다. 이는 낮은 주파수부터 Ka 대역까지 구현이 가능하지만, 패턴의 가공 기술의 한계로 광대역 구현이 어렵다. FBAR FILTER는 실리콘 기반으로 MEMS 공정을 이용하여 정밀 가공이 가능하지만 낮은 Q 값과 통과 대역의 광대역 형성에는 어려움 부분이 있다.

RF MEMS 수동 대역 통과 필터는 많은 장점이 있다. 우선 초소형화가 가능하다. 실리콘 재료를 기반으로 부피, 무게가 작고, 공진기의 주파수가 높은 주파수가 되면 응답시간이 짧고, 물성 적으로는 경도가 높고, 열 전도성이 높고, 밀도가 작아 우수한 기계적, RF 특성이 있다. MEMS 공정은 CMOS 공정과 유사하여 대량 생산이 가능하고, RF MEMS 수동 대역 통과 필터의 생산 원가를 감소시킬 수 있다. 본 논문은 초소형 정밀 시스템 (Micro Electro Mechanical System, MEMS)의 공정을 이용하여 마이크로파 수동 대역 통과 필터를 소개하는 것이다.

2. 본론

2.1 초고주파 필터

초고주파 필터는 특정 주파수 대역에 대하여 신호를 통과, 억제하는 특성을 가지도록 설계된다. 설계자가 원하는 주파수를 통과, 억제하는 특성에 따라 저역 통과 필터(Low Pass Filter, LPF) 고역 통과 필터(High Pass Filter, HPF), 대역 감쇄 필터(Band Rejection Filter, BRF), 대역 통과 필터(Band Pass Filter, BPF)으로 분류를 할 수 있다. 4가지 종류의 필터를 구성하기 위해서는 인덕턴스(Inductance) 성분과 캐패시턴스(Capacitnce) 성분의 조합으로 설계를 할 수 있다. 저역통과 필터는 낮은 주파수를 통과시키고 높은 주파수는 감쇄시키는 특성을 가지는 필터이다. 이 필터는 LC 조합의 구성으로 직렬로 L, 병렬로 C를 구현하여 직렬 인덕턴스를 통하여 높은 주파수는 통과를 못 하고 낮은 주파수는 통과한다. 또한 병렬 캐패시턴스는 높은 주파수를 통과하여 접지로 신호를 흐르게 하여 낮은 주파수는 캐패시턴스를 지나치지 못하게 하여 전체적으로 낮은 주파수는 신호라인을 따라 신호가 전달되고, 높은 주파수는 신호라인에서는 저항을 받아 전달되지 않아 낮은 주파수만이 신호가 전달된다. 고역 통과 필터는 저역통과 필터의 반대로 구성으로 직렬로 캐패시턴스, 병렬로 인덕턴스로 구현하여 낮은 주파수는 직렬의 신호라인으로 흐르지 못하게 되고, 높은 주파수는 직렬의 신호라인을 따라 신호가 전달되어 반대로 필터의 역할은 한다. 대역 감쇄 필터는 병렬로 인덕턴스와 캐패시턴스가 구현되어 LC 공진 주파수에 의해 해당하는 신호가 병렬 신호라인에 따라 신호가 전달되어 신호는 접지 신호로 전달되어 특정 주파수가 감쇄된다. 대역 통과 필터는 대역 감쇄 필터와는 반대로 구성되어 직렬로 인덕턴스와 캐패시턴스가 구현되어 LC 공진 주파수에 의해 해당하는 신호만이 직렬 신호라인을 따라 신호가 전달되어 특정 주파수 대역의 신호만 전달이 된다.

2.2 필터의 구성

필터의 구성과 특성을 보면 2-port의 회로망과 S-Parameter를 이용하여 표현할 수 있다. 이상적인 필터의 경우 입력된 신호가 아무런 손실 없이 그대로 출력이 되지만, 실제 제품을 구현하면은 입력된 신호가 필터 성능에 따라 손실을 주게 되며 그 값은 0dB 이하의 삽입손실(S21) 값을 갖는다. 이러한 필터의 설계는 수식적인 설계값을 근사화한 필터 함수 버터워스 함수와 체비셰프 함수가 있다. 이 함수로 필터의 차수, 회로 설계에 필요한 기본 회로 구성으로 설계를 할 수 있다. 마이크로파 대역 주파수에서는 회로 내의 전압, 전류 값을 측정하기 어려우므로 2-port 회로망에서는 입력 전압파와 반사 전압파를 이용하여 표현을 할 수 있다.

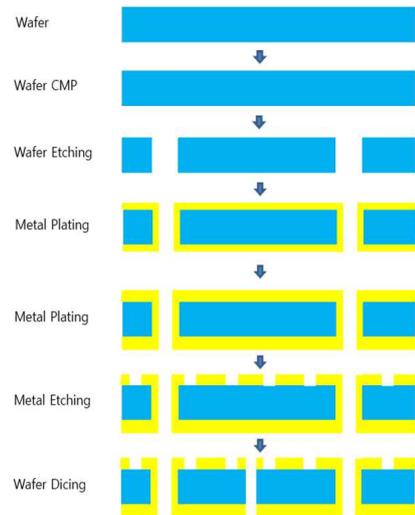


그림 4. MEMS 공정도
Fig. 4 MEMS Process

2.3 S-Parameter

S-Parameter는 전자파의 전력 형태에 관한 것으로 입사 전력파와 반사 전력파에 관련되어 회로의 입력과 출력 관계를 정의할 수 있다. 이 S-Parameter는 4가지의 특성이 있다. 첫째, Transmission은 입력 포트대 출력 포트의 비로 입력 신호를 전송하고자 하는 포트까지 얼마나 도달하느냐를 확인하고 2포트 소자라면 그 값은 S21이 해당한다. 둘째, Reflection은 각각의 입력 출력 포트의 자체 반사값이다. S11, S22, S33 와 같이 입력과 출력포트가 같은 경우이며 자기가 입력하고 출력하여 반사되는 값이다. 셋째, Coupling이다. 일반적으로 연결되지 않은 선로의 간섭이나 원하지 않아도 유출되는 전력을 의미한다. 넷째, Isolation이다. 전력을 중단시키는 포트 4-Port에서는 S41의 경우이다. 버터워스 (Butterworth) 함수의 필터 특성은 통과 대역이 평평하고 값이 내려가는 부분을 스커트(Skirt)라 부르는데 이는 체비셰프 함수 필터와 비교하면 완만하고, 이 함수는 필터의 차수가 증가 시, 이상적인 필터에 가까워지는 특성이 있다. 체비셰프 (Chebyshev) 함수의 필터 특성은 통과 대역이 일정하지 않고, 리플(Ripple)이 존재하고 이러한 리플이 좋지는 않지만, 이 리플로 인해 스커트 특성이 좋고, 스커트 특성이 좋아질수록 리

플이 커진다. 이러한 RF Filter의 특성을 이용하여 초소형 MEMS 광대역 통과 대역 필터의 설계를 진행한다.^[4]

2.4 인터디지털 필터

초소형 MEMS 광대역 통과 대역 필터는 컴라인이 아닌 인터디지털 형태의 구조로 결합한 라인 요소로 설계하였고, 부하 커패시턴스 및 종단 어드미턴스의 특정 배열이 완전한 구조를 형성하는 용량성 부하 전송 라인 유형이다.^[5] $\lambda/4$ 라인의 단락 종단이 있는 결합 라인 구성을 선택하면 직사각형 전송 구조에서 유용한 필터 형태를 구성할 수 있다. 선이 반대쪽 끝에서 단락된 구조의 형태를 취하며 인터 디지털 필터라고 한다. 인터 디지털 광대역 필터에는 여러 가지 장점이 있다. 첫째, 크기가 매우 작고 디자인이 소형일 수 있다. 둘째, 공진기 요소 사이의 간격이 상대적으로 넓으므로 제조 공정에서 필요한 허용 오차가 상대적으로 완화된다. 셋째, 두 번째 통과 대역은 첫 번째 통과 대역의 중심주파수의 3배에 중심을 두고 있으며 그사이 스푸리어스 응답의 가능성이 없다. 넷째, 첫 번째 차단 속도와 정지 대역의 강도는 dc 및 첫 번째 통과 대역 중심 주파수의 짝수 배수에서 감쇠의 다차 극에 의해 향상된다. 다섯째, 이러한 필터는 자체적으로 지지가 되는 구조적 형태로 제조될 수 있으므로 유전 물질을 사용할 필요가 없으므로 유전 손실이 제거될 수 있다.

표 1. 성능 지표

Table 1. Performance Table

항목	성능 규격
주파수 범위	2GHz ~ 6GHz
Insertion Loss, Max.	Center Frequency : 4.0dB
Ripple, Max.	2GHz ~ 6GHz : 1.0dB
Return Loss, Min.	2GHz ~ 6GHz : 10.0dB
Rejection, Min.	@1GHz : 25.0dB
	@7.5GHz : 25.0dB

2.5 필터 설계

인터 디지털 필터의 특성을 가지고 MEMS 공정을 적용하여 그림 4와 같이 공정을 설계하고, 실리콘 웨이퍼는 5,000 Ω .cm 이상의 비저항 값을 같은 웨이퍼로 제작을 진행한다.^[6] Band Pass Filter는 다음과 같은 성능을 기준으로 설계를 진행한다. 주파수 범위는 광대역으로 중심주파수 대비 100%의 비율을 가지는 대역 통과 필터이다.^[7] 삽입손실은 주파수 대역을 신호가 통과할 때 중심주파수에서 4dB의 손실을 주고, 주파수 1 GHz, 7GHz에서 25dB의 감쇠량을 가진다.

Band Pass Filter 설계에서 필요한 공진기 수는 9개이고, 홀수 단으로 대칭 구조이다. 대역폭 4GHz, 반사 손실 10dB에 따라 g Value 계산값은 아래 표2와 같다.

표 2. G Value & Coupling 계수

Table 2. G Value & Coupling Value

Order	g Value	Coupling Value
1	1.0253	39998.98
2	1.4618	3349.02
3	1.9853	2406.72
4	1.6772	2246.87
5	2.0663	2202.39
6	1.6772	2202.39
7	1.9853	2246.87
8	1.4618	2406.72
9	1.0253	3349.02
10	1.0000	3998.98

설계 시 Coupling 계수값이 크게 구성되어, 공진기 간에 간격이 아주 가깝게 설계가 진행되므로 Mask 도면 설계 시 이 점을 유의하여야 하며, MEMS 공정에서 진행되는 오차도 설계 시 반영되어야 한다. 비아홀(Via Hole)의 크기는 실리콘 두께에 맞게 선택비를 최대한 크게 하여 설계에 적용하였고, 설계 치수는 아래 그림5와 같다. 제품의 크기는 6.95(mm) x 4.7(mm)이고 이후 실제 제품에서는 실리콘 절삭 공정이 있어서 오차가 발생한다. 표2와 같이 설계 지표로 3D 시뮬레이션 한 값은 아래 그림 6과 같다.

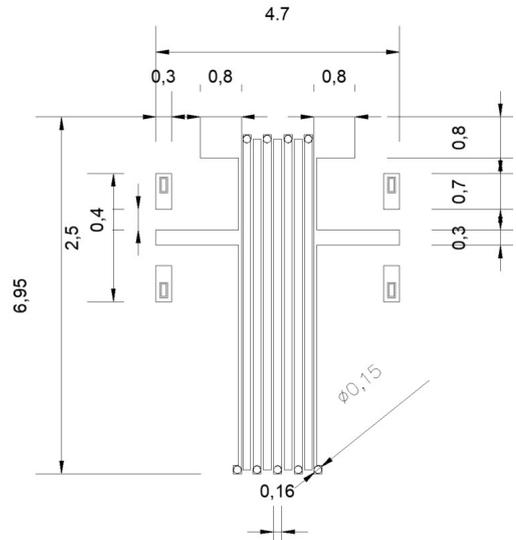


그림 5. 광대역 대역 통과 필터의 설계

Fig. 5 Design of Wideband Band Pass Filter

표 3 설계 지표
Table 3 Simulation Tabel

항목	치수(mm)	비고
공진기-1 폭	0.025	공진기-9 폭
공진기 1-2 간격	0.025	공진기 8-9 간격
공진기-2 폭	0.025	공진기-8 폭
공진기 2-3 간격	0.025	공진기 7-8 간격
공진기-3 폭	0.025	공진기-7 폭
공진기 3-4 간격	0.025	공진기 6-7 간격
공진기-4 폭	0.025	공진기-6 폭
공진기 4-5 간격	0.025	공진기 5-6 간격
공진기-5 폭	0.025	-

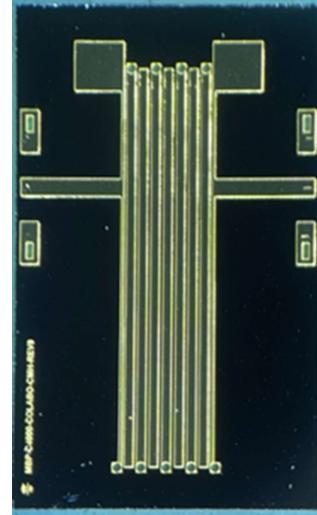


그림 7. 광대역 대역 통과 여파기
Fig. 7 Wideband Band Pass Filter

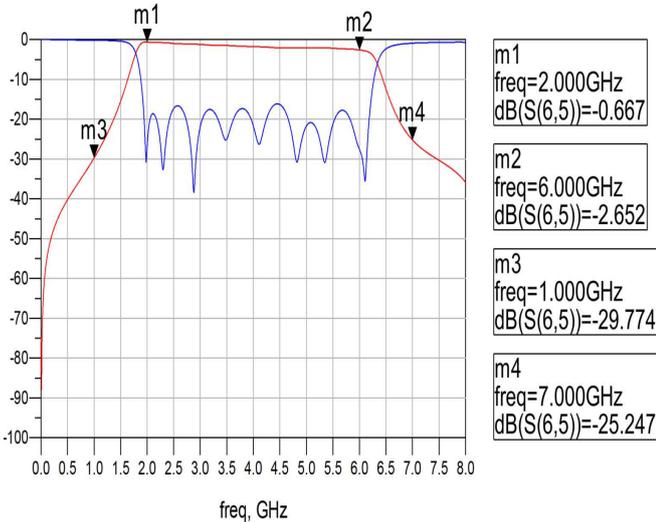


그림 6. 광대역 대역 통과 여파기 설계 시뮬레이션 값
Fig. 6 Wideband Band Pass Filter Simulation Data

3. 측정

설계에 맞게 제작된 초소형 MEMS 광대역 대역 통과 여파기의 제품은 그림 7과 같다. 설계치와 실측치의 값의 비교는 표 3과 같이 같다. 설계치와 실측치의 차이 값은 크게 나지 않아 공정에서 설계치의 값과 유사함을 확인되었다. 비교 값으로 MEME 공정에 대한 부분 또한 안정화를 확인하였다. 제작된 MEMS 광대역 대역 통과 필터 RF 성능은 Agilent N5245B 벡터 네트워크 분석기와 GSG RF 프로브가 있는 프로브 스테이션을 사용하여 테스트 되었다. 그림 8은 테스트 S 파라미터이다.

제작된 제품은 산업용 현미경 고배율 X300 배율 렌즈로 치수를 측정하였고, 측정 장비는 비접촉 방식이며 오차 범위는 1um 이내의 고정밀 측정 검사가 가능한 제품으로 측정하였다. 실측치 값은 측정 장비 오차 범위 이내에서 측정이 되었고, 측정 장비 특성 상 공진기의 폭, 공진기 간의 간격은 실측치를 확인할 수 있으나, 공진기의 길이는 측정을 할 수 없어 표3과 같이 정리하였다.

표 4. 설계 지표와 실제 제품 간 비교
Table 4. Simulation Table

항목	설계치	실측치	비고
공진기-1 폭	25µm	25µm	공진기-9 폭
공진기 1-2 간격	25µm	25µm	공진기 8-9 간격
공진기-2 폭	25µm	25µm	공진기-8 폭
공진기 2-3 간격	25µm	25µm	공진기 7-8 간격
공진기-3 폭	25µm	25µm	공진기-7 폭
공진기 3-4 간격	25µm	25µm	공진기 6-7 간격
공진기-4 폭	25µm	25µm	공진기-6 폭
공진기 4-5 간격	25µm	25µm	공진기 5-6 간격
공진기-5 폭	25µm	25µm	-

필터 중심주파수는 4GHz이고 대역폭은 4GHz의 대역폭을 갖는다. 대역 내 삽입손실은 약 4dB이고 반사 손실은 9.7dB이며 전압 정재파 비율(VSWR)은 약 2.0 미만이다. 대역 외 제거는 1GHz 및 7.5GHz에서 25dB보다 큰 감쇠량의 특성을 갖는다.

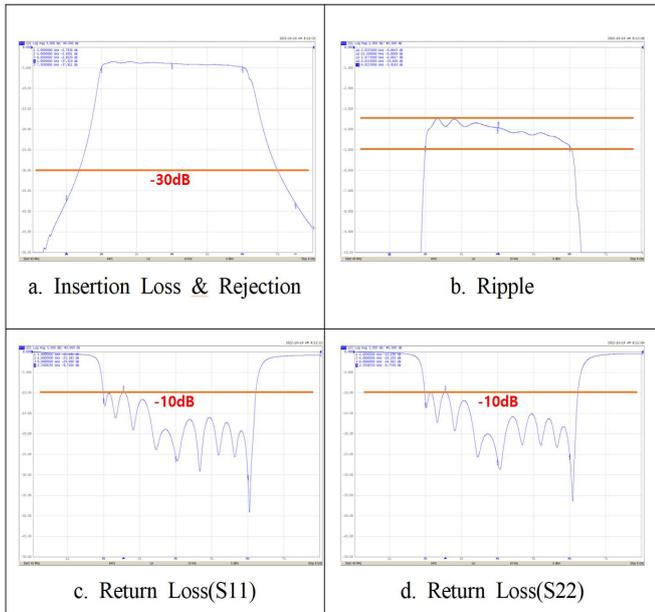


그림 8. 광대역 대역 통과 여파기 data
Fig. 8 Wideband Band Pass Filter data

표 5. 성능 지표와 제품 data 비교
Table 5. Performance Table

항목	성능 규격	data 값
주파수 범위	2GHz ~ 6GHz	2GHz ~ 6GHz
Insertion Loss , Max.	Center Frequency : 4.0dB	3.92dB
Ripple , Max.	2GHz ~ 6GHz : 1.0dB	0.88dB
Return Loss , Min	2GHz ~ 6GHz : 10.0 dB.	9.7dB
Rejection , Min	@1GHz : 30.0 dB	37.5dB
	@7.5GHz : 30.0 dB	37.9dB

그림 8은 a. Insertion Loss b. Ripple, c.Return Loss(S11), d.Return Loss(S22)의 S-파라미터의 데이터 값을 표시하였고, 측정된 data 값이다. Insertion Loss값은 3.92dB로 성능 규격 4.0dB 이내로 만족하는 측정값을 확인하였고, Ripple 값은 0.88dB로 성능 규격 1.0dB 이내로 만족한다. Rejection 값은 1GHz에서 37.5dB, 7.5GHz에서 37.9dB로 성능 규격 30dB 이상의 성능을 만족한다. Return Loss는 성능 규격 10.0dB 이상의 성능을 만족하지 못하는 9.7dB 값을 확인하였다.

4. 결론

본 논문은 전자전에 사용되는 S-대역에 사용되는 스위치 필터 बैं크 필터를 구현하였다. 이 필터는 인터디지털 형태를 가지는 필터로 광대역 형성에 유리하다. 기존 필터들이 시스템

내에 설치되어 사용되고 있지만, 스위치 필터 बैं크의 특성상 공중 무인 항공기 또는 정찰기에 장착되어 사용되어, 체적 및 무게에 대한 이슈가 많이 있다. 이러한 부분을 보안을 유지하기 위하여 초소형 MEMS 광대역 통과 필터를 소개한다.

이 필터의 장점은 첫째, 공정을 MEMS 공정을 이용하여 제작하는 것이다. 이는 초소형화를 위해 가공 기술이 필요한데, MEMS 공정을 이용하면 1um 이하 단위까지 가공할 수 있어 제품 제작에 쉽고 설계에서 패턴 간의 간격이 25um이므로 안정적인 공정을 진행할 수 있다. 둘째, 비대역폭이 100%를 가지며 특정 주파수에서의 감쇠량이 많다는 것이다. 제작된 필터의 전기적 특성은 중심주파수는 4GHz이며, 비대역폭은 100%를 갖는 인터 디지털 형태의 필터이다. 삽입손실은 중심주파수에서 4.0dB, 1.0GHz 및 7.5GHz에서 감쇠량 30dB 이상, 반사 손실 10dB 이하이다. MEMS 광대역 대역 통과 필터는 소형, 고성능 및 집적도와 같은 우수한 성능을 보여준다. 방위 산업의 전자전 스위치 필터 बैं크외에 민수용 통신 시스템의 5G에 사용할 수 있고, 칩 형태의 QFN 패키지 타입으로도 적용할 수 있다.

사 사

본 연구는 2022년도 중소벤처기업부 산학연 Collabo R&D 사업 및 2021학년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음

References

- [1] A. Spezio, "Electronic warfare systems," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol.50, no.3, 2002, pp.633-644.
- [2] J. Burdick and J. Svoboda, "Slashing the Footprint of Switched Filter Banks," Microwave & RF websites, 2021, www.mwrf.com/technologies/components/article/21171504/knowles-precision-devices-slashing-the-footprint-of-switched-filter-banks.
- [3] R. Cameron, C. Kudsia, and R. Mansour, "Microwave filters for communication systems: fundamentals, design, and applications," John Wiley & Sons, 2018.
- [4] M. Yuceer, "A reconfigurable microwave combine filter." IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, vol.63, no.1, 2015, pp.84-88.
- [5] J. Hong, and M. Lancaster, "Microstrip filters for RF/microwave applications," John Wiley & Sons, 2004.
- [6] Y. Cho, S. Kim, and S. Kim, "Wafer Level Bonding Technology for 3D Stacked IC." Journal of the Microelectronics and Packaging Society, vol.20, no.1, 2013, pp.7-13.
- [7] A. Makrariya and P. Khare, "Microstrip interdigital bandpass filters: Design analysis," International Journal of Scientific & Engineering Research, vol.7, no.3, 2016, pp.702-705.